أساسيات
تكنولوجيا الخرسانة

الأستاذ الدكتور

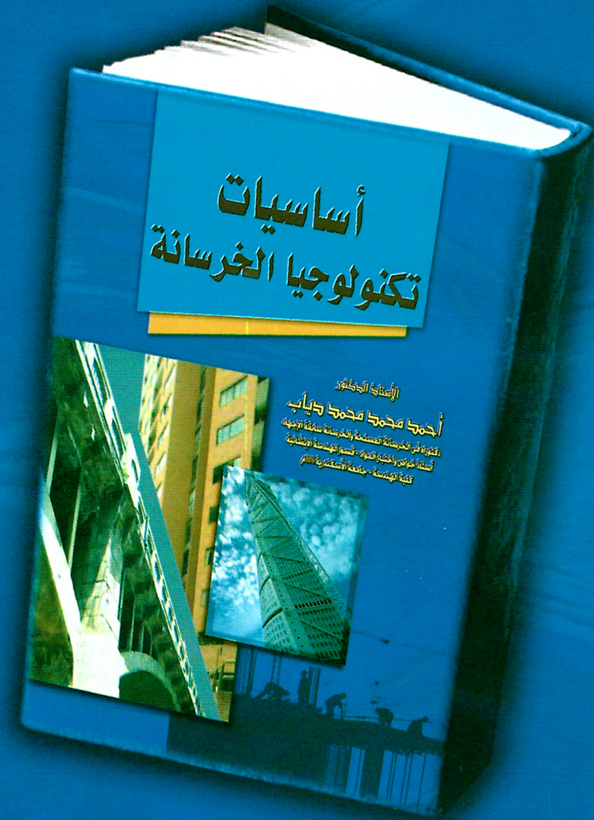
أحمد محمد محمد دياب

دكتوراه فى الخرسانة المسلحة والخرسانة سابقة الإجهاد
أستاذ خواص واختبار المواد - قسم الهندسة الإنشائية
كلية الهندسة - جامعة الأسكندرية



أساسيات تكنولوجيا الخرسانة

أ.د/ أحمد محمد محمد دياب





الباب السابع
مقاومة الخرسانة (Concrete Strength)

1-7 مقدمة:

يتعرض المنشأ الخرسانى لأنواع عديدة من الإجهادات. وقد تكون هذه الإجهادات إجهادات ضغط؛ كما فى حالة الأعمدة, أو تكون إجهادات شد؛ كما فى حالة الخزانات الدائرية, وقد تكون هذه الإجهادات مصاحبة بإجهادات انحناء. ويجب ألا تزيد قيم الإجهادات المتولدة فى قطاعات المنشأ عن القيم التى تقاومها الخرسانة بأمان. وتُعد الخرسانة مثالاً للمواد القصفة؛ التى تقاوم إجهادات الضغط بكفاءة ولكنها ضعيفة فى مقاومة إجهادات الشد لدرجه يمكن إهمالها. وتفترض معظم طرق تصميم القطاعات الخرسانية المسلحة أن مقاومة الخرسانة فى الشد مهملة. لذلك فى الأماكن التى تتواجد فيها إجهادات شد يستعان فيها بمادة أخرى تتحمل الشد مثل الصلب أو البوليمرات المسلحة بالألياف (FRP). وهذا ما يحدث فى تصميم القطاعات الخرسانية المسلحة. ويلاحَظ أن الخرسانة تتعرض لإجهادات قص تجعل من الأهمية دراسة مقاومة الخرسانة لإجهادات القص.

ومما سبق يتضح أن مقاومة الخرسانة للضغط تلعب دوراً هاماً فى أغلب المنشآت, حيث يعتمد عليها فى مقاومة إجهادات الضغط.

ولذلك توصى معظم الكودات بأخذ مقاومة الضغط كمقياس لجودة الخرسانة وقبول أو رفض خرسانة المنشأ. ونظراً لارتباط المقاومات المختلفة للخرسانة بمقاومة الضغط؛ حيث كلما تحسنت مقاومة الضغط تحسنت المقاومات الأخرى, لذلك تم استنتاج علاقات مختلفة تربط مقاومة الضغط بالمقاومات الأخرى؛ مثل مقاومة شد الخرسانة ومقاومة القص. وبذلك يمكن استنتاج مقاومات الخرسانة المختلفة بالاستعانة بمقاومة الخرسانة.

2-7 العوامل المؤثرة على مقاومة الخرسانة للضغط:

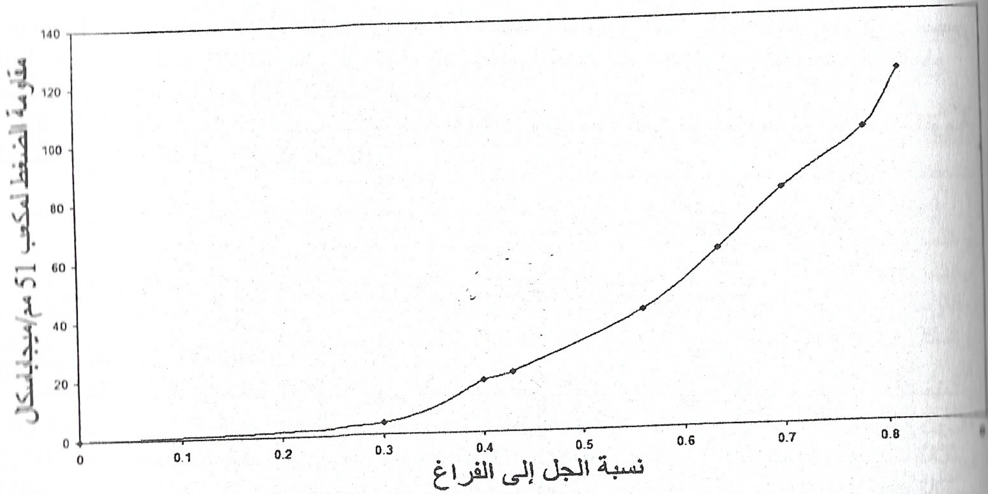
1- تأثير نسبة الجل إلى الفراغات وتأثير نسبة الماء إلى الأسمنت:

تعتمد مقاومة الخرسانة على مقاومة المادة الرابطة (جل الأسمنت المتصلد). وكلما نقصت W/C. يزيد تركيز الجل وبالتالى المقاومة. وهناك علاقات كثيرة تربط نسبة الجل إلى الفراغات ونسبة الماء إلى الأسمنت. ومن هذه العلاقات:

$$X = \frac{0.647\alpha}{0.319\alpha + W/C}$$

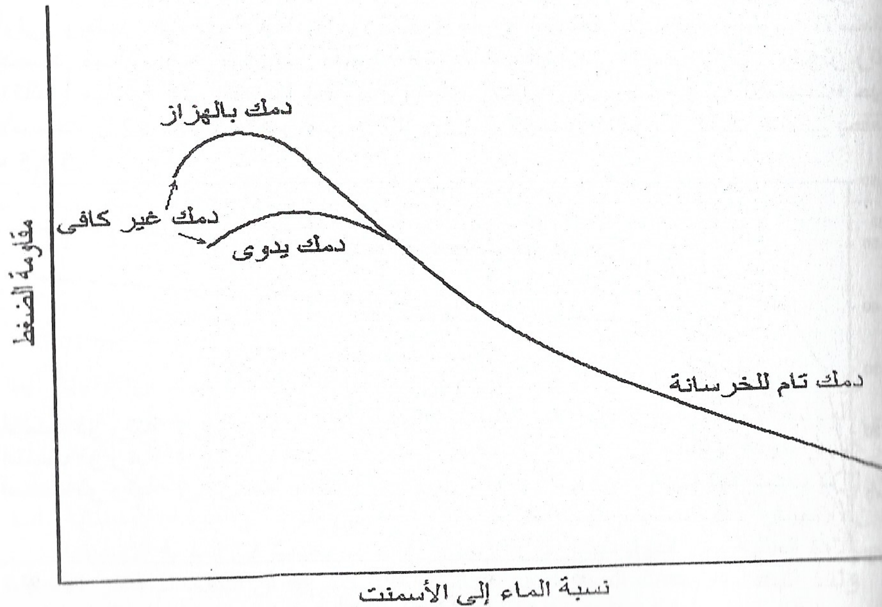
حيث X هى نسبة الجل إلى الفراغات و α نسبة الأسمنت الذى تم إماهته و كلما زادت نسبة الجل تزيد مقاومة الضغط.

والشكل (1-7) يوضح تأثير نسبة الجل إلى الفراغات على مقاومة الضغط.



شكل (1-7) تأثير نسبة الجل إلى الفراغات على مقاومة الضغط

والشكل (2-7) يوضح تأثير نسبة الماء إلى الأسمنت على مقاومة الضغط.



شكل (2-7) شكل تخطيطى يوضح تأثير نسبة الماء إلى الأسمنت على مقاومة الضغط

ومن شكل (2-7) يتضح أنه كلما زادت نسبة الماء إلى الأسمنت تقل المقاومة نتيجة زيادة نسبة الفراغات ونقصان تركيز الجل. ويلاحظ من الشكل كذلك أنه عند نقصان W/C عن قيمة

معينة تبدأ مقاومة الضغط فى النقصان نتيجة التشغيلية السيئة والدمك الغير كافى مما يزيد حجم الفراغات. ومن المهم التأكيد على أن الماء المستخدم لتحديد نسبة الماء إلى الأسمنت هو الماء الصافى, ولا يشمل الماء الذى يمتصه الركام.

وقد قام أبرامز بعمل دراسات عديدة سنة 1919, وتوصل على إثرها لمعادلة لحساب مقاومة الضغط (f_{cu}) كدالة من W/C كما يلى:

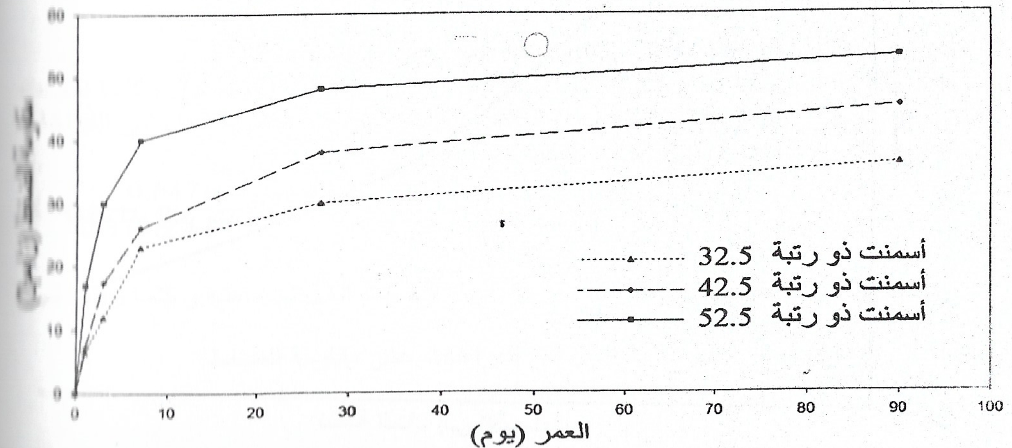
$$f_{cu} = \frac{K_1}{K_2^{W/C}}$$

حيث K2, K1 ثوابت وضعية تمثل تأثير العوامل الأخرى على المقاومة.

2- تأثير خواص الأسمنت:

تعتمد مقاومة الخرسانة المكوَّنة من الأسمنت البورتلاندى على تركيب ونعومة الأسمنت. ومن المعروف أن المكونين الأساسين للأسمنت هما سليكات ثلاثى وثنائى الكالسيوم (C_3S, C_2S). حيث تصل نسبتهما فى الأسمنت حوالى 70-80 %. وكلما زادت نسبة سيلكات ثلاثى الكالسيوم, فإنه ينتج عن ذلك مقاومة مبكرة عالية. والعكس, فإنه كلما قلت نسبة سيلكات ثلاثى الكالسيوم وزادت سليكات ثنائى الكالسيوم, أدى ذلك إلى الوصول إلى مقاومة الخرسانة ببطء. وقد وُجد أن ألومينات ثلاثى الكالسيوم (C_3A) يُحسّن من المقاومة المبكرة؛ نظراً لتفاعله مع الجبس والماء وتكوين مونوسلفوألومينات. ولذلك فى حالة استخدام أسمنت مقاوم للكبريتات (نسبة C_3A منخفضة) ومادة مؤجلة للشك, قد تكون المقاومة المبكرة ضعيفة جداً.

وتؤثر نعومة الأسمنت على مقاومة الخرسانة, حيث أن زيادة المساحة السطحية لزيادة النعومة؛ مما يؤدى إلى زيادة معدل إماهة الأسمنت, مما يكسب الخرسانة مقاومة كبيرة فى الأيام الأولى. ويظهر ذلك فى الأسمنت البورتلاندى سريع التصلد, حيث تزداد نعومة الأسمنت سريع التصلد, مما يجعله يصل إلى مقاومة انضغاط عالية فى الأيام الأولى. وتؤثر رتبة الأسمنت تأثيراً مباشراً على اكتساب المقاومة. وشكل (7-3) يوضح تأثير رتبة الأسمنت؛ حيث يحقق الأسمنت 52.5 مقاومة أكبر من 42.5 و32.5 خاصةً المقاومة المبكرة التى يحققها الأسمنت 52.5.



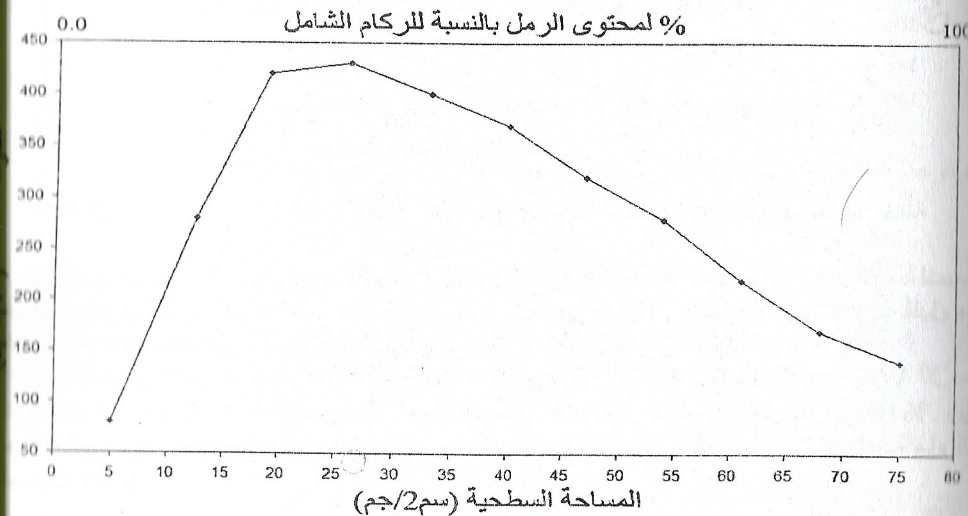
شكل (7-3) تأثير رتبة الأسمنت على مقاومة الخرسانة

كلما زادت نعومة الأسمنت تزيد مقاومته المبكرة.

3- تأثير الركام:

بالرغم من أن تأثير نسبة المياه إلى الأسمنت هوالعامل الأكثر أهمية, إلا أنه لا يمكن إهمال تأثير الركام. ويؤثر نوع وتدرج الركام على مقاومة الخرسانة. ولكن مقاومة الركام للضغط غالباً لا تؤثر على مقاومة الخرسانة ذات المقاومة الضعيفة والمتوسطة؛ حيث تزيد مقاومة ضغط الركام غالباً على مقاومة انضغاط العجينة الأسمنتية.

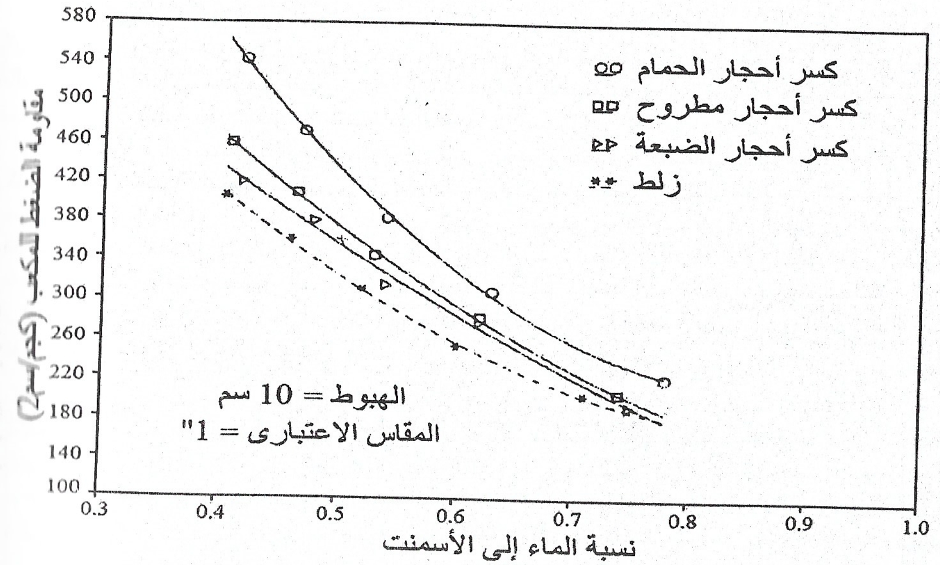
ومن المعلوم أن استخدام رمل متدرج خشن يحقق مقاومة ضغط أعلى من الرمل الناعم. وكلما زادت النسبة المئوية لمحتوى الرمل بالنسبة للركام الشامل, تقل مقاومة الضغط. ولذلك يجب عدم المبالغة فى زيادة محتوى الرمل. ويؤثر المحتوى النسبى للركام الكبير والصغير على مقاومة الخرسانة؛ حيث أنه بزيادة نسبة الرمل تزيد المساحة السطحية وبذلك تقل المقاومة. وشكل (7-4) يوضح تأثير المساحة السطحية, ولذلك يفضل استخدام مساحة سطحية للركام تتراوح بين 25 و35 سم^2/جرام, إلا فى حالة الخرسانات الخاصة مثل الخرسانة ذاتية الدمك حيث يزيد محتوى الرمال لتحقيق هدف آخر وهو عدم الانفصال.



شكل (7-4) تأثير المساحة السطحية على مقاومة الخرسانة

يؤثر نوع الركام الكبير تأثيراً مباشراً على مقاومة الخرسانة, حيث أن الانهيار إما أن يحدث فى المونة الأسمنتية أو يحدث فى حبيبات الركام أو يحدث بين السطح الفاصل بين حبيبات الركام والمونة. ولذلك فإن الخرسانة الخفيفة المصنوعة من الطين القابل للتمدد (Expanded Clay) يحدث لها انهيار فى الركام. بينما فى حالة الركام الكبير ذو الصلادة العالية مثل الزلط فإن الانهيار غالباً ما يتم نتيجة ضعف الترابط بين الزلط والمونة الأسمنتية. أما الركام ذو الصلادة العالية مثل الدولوميت, فإن الانهيار غالباً ما يحدث فى المونة الأسمنتية.

ولقد أثبتت الأبحاث المجراه فى جامعة الأسكندرية أن استخدام كسر الأحجار الجيرية الوردية اللون الصلبة فى الخرسانة يحقق مقاومة ضغط أعلى من خرسانة الزلط. وذلك نظراً لتحسن الترابط بين حبيبات كسر الأحجار والمونة الأسمنتية ولعوامل أخرى. وشكل (7-...) يوضح مقارنة بين خرسانة الزلط وخرسانة كسر الأحجار من محاجر مختلفة بمصر لقيم هبوط الخرسانة.



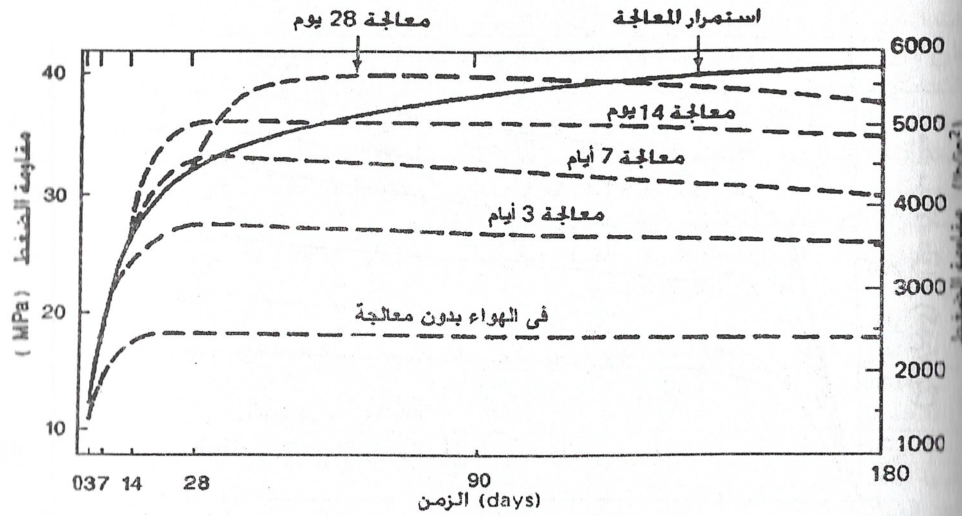
شكل (7-5) تأثير نوع الركام الكبير على مقاومة الضغط للخرسانة لنفس هبوط الخرسانة

ويرجع تحسن مقاومة خرسانة ركام الحجر الجيرى الصلد كما سبق وأن ذكرنا لتحسن خواص الترابط بين المونة الأسمنتية وكسر الحجر الجيرى الذى يتميز بالخشونة وبه قليل من المسامية, بالإضافة إلى وجود ترابط كيميائى بين الحجر الجيرى ومونة الأسمنت.

وقد وُجد أن تأثير نوع الركام الكبير يتوقف على نسبة الماء للأسمنت. فلنسبة W/C أقل من 0.4 نجد أن مقاومة الضغط لخرسانة كسر الأحجار أكبر من مثيلتها للزلط بحوالى 18%. ويقل هذا التأثير مع زيادة نسبة الماء إلى الأسمنت؛ حيث يتلاشى هذا التأثير تقريباً عند نسبة ماء إلى أسمنت 0.65.

4- تأثير المعالجة:

يلزم معالجة الخرسانة بعد التصلد مباشرة لتعويض الماء المتبخر من الخلطة, لتأخير وتقليل الانكماش المبكر للخرسانة وتوفير ماء كافٍ لعملية الإماهه المستمرة للخرسانة. وكلما كانت المعالجة مبكرة (فى الأيام الأولى) يؤدى ذلك للوصول إلى مقاومة الخرسانة المطلوبة, شكل (7-6), والشكل يوضح أهمية معالجة الخرسانة حتى وإن غابت فى الأيام الأولى.



شكل (7-6) تأثير المعالجة على مقاومة الخرسانة

وتوجد عدة طرق لمعالجة الخرسانة من بينها:

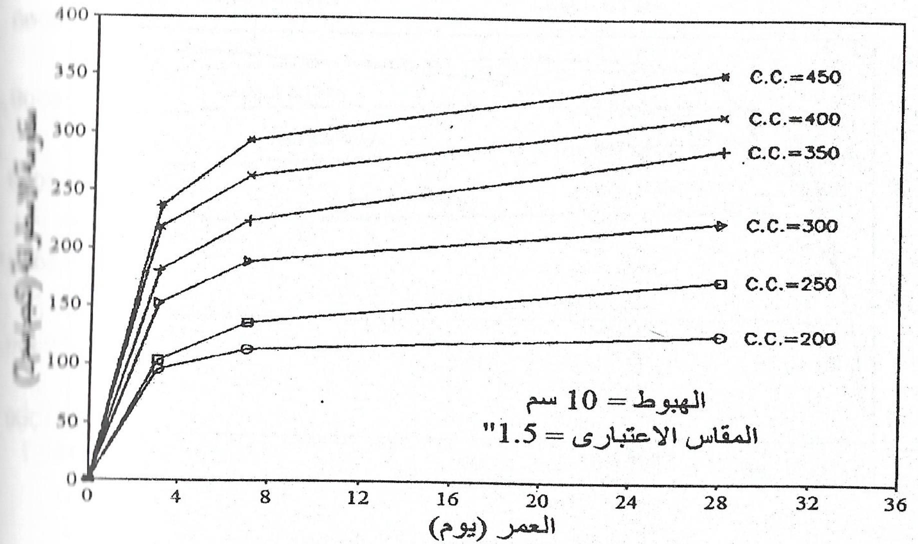
1. رش الخرسانة بالماء: وهذه الطريقة فعاليتها قليلة نظراً لعدم بلل الخرسانة بالماء باستمرار.
2. بلل الخرسانة: عن طريق تغليفها بواسطة خيش مبلل, وهى طريقة فعاليتها جيدة.
3. التغطية بطبقة من الرمال المشبعة بالماء.
4. الدهان بمواد تعمل على منع خروج الماء من داخل الخرسانة للخارج: ويجب التأكد من صلاحية تلك المواد قبل استخدامها, وغالباً ما تستخدم فى حالة عدم توفر الماء للمعالجة.
5. المعالجة ببخار الماء: حيث تؤدى إلى تعجيل المقاومة المبكرة.

5- تأثير الإضافات:

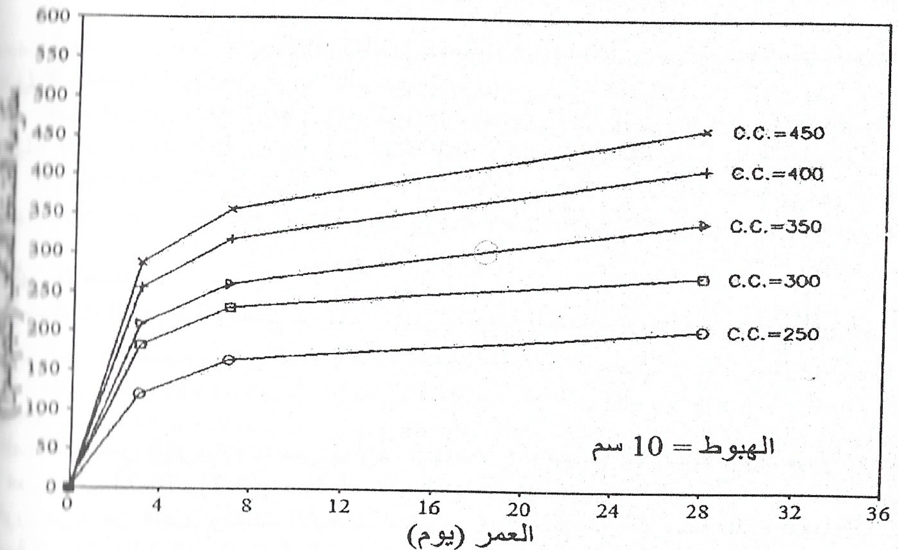
للإضافات الكيميائية والمعدنية تأثير على مقاومة الضغط. وسيتم التعرض لها فى الباب الثامن.

6- العمر:

كلما تقدم عمر الخرسانة تتحسن مقاومة الضغط, مالم تهاجم الخرسانة بمواد ضارّة. ويتضح ذلك من شكلى (7-6) و(7-7), حيث أنه كلما تقدم عمر الخرسانة تزيد كمية الأسمنت المماهة وتكون مزيد من الجل. وأثبتت الأبحاث استمرار زيادة مقاومة الخرسانة لفترة طويلة قد تصل لخمسة سنوات إذا توفر ماء معالجة.



شكل (7-7 - أ) العلاقة بين العمر ومقاومة الضغط للاسطوانة لمحتويات أسمنت مختلفة



شكل (7-7 - ب) العلاقة بين العمر ومقاومة الضغط للمكعب لمحتويات أسمنت مختلفة

من المهم جداً بالنسبة للمهندس أن يتعرف على نسبة مقاومة الضغط للخرسانة عند عمر معين منسوبة إلى مقاومة 28 يوم.

وهذا العامل بالطبع يتأثر بعوامل متعددة؛ مثل رتبة الأسمنت ونعومة الأسمنت وعلى الأخص بمحتوى أسمنتها، والذى يتضح من شكل (7-7). وتزداد أهمية محتوى الأسمنت فى الخرسانة ذات المقاومة العالية حيث أنه لنفس الهبوط تتحسن المقاومة مع زيادة محتوى الأسمنت. ويجب على المهندس تحديد نسبة مقاومة الضغط لليوم لمقاومة الـ 28 يوم فى حالة صب الخرسانة بالشدات النفقية, ونسبة المقاومة عند الثلاثة أو السبعة أيام بالنسبة للمقاومة عند 28 يوم للإنشاء العادى وذلك لفك الشدة. وهنا يختبر المهندس عينات الخرسانة عند يوم أو عند ثلاثة أيام أو سبعة أيام وباستخدام النسب التقريبية يتم توقع مقاومة الـ 28 يوم, وبناءً على ذلك يقرر المهندس هل سيتم صب الخرسانة للأعضاء اللاحقة إذا كانت المقاومة المتوقعة تحقق المقاومة المطلوبة, أم سيتم التوقف لدراسة أسباب نقص المقاومة المتوقع.

وجدول (7-1) يوضح النسب السابق ذكرها مبنية على دراسة قام بها Meyer لأسمنت بورتلاندى عادى بدونً أية اضافات .

جدول (7-1) نسبة مقاومة الضغط عند عمر معين إلى مقاومة الضغط عند عمر 28 يوم

نسبة الماء للأسمنت	0.80				0.60				0.40			
العمر يوم	1	3	7	28	1	3	7	28	1	3	7	28
نسبة المقاومة عند العمر إلى المقاومة عند 28 يوم	0.09	0.4	0.7	1	0.12	0.4	0.7	1	0.19	0.57	0.78	1

ويجب على المهندس فى الموقع تحديد تلك النسبة باستخدام نفس الخامات الموجودة فى الموقع واستخدامها بعد ذلك.

7-... تأثير إجهاد الضغط العرضى (Lateral Stress):

تتأثر مقاومة الخرسانة فى الضغط بوجود إجهاد عرضى أو إجهادات مركبة. وسوف يتم تناول هذا التأثير فى بند (7-6).

7-3 العوامل المؤثرة على اختبار مقاومة الضغط:

يحدد الكود المصرى نتيجة اختبار مقاومة الضغط لمكعب قياسى بأبعاد 150×150×150 مم كتجربة قياسية للتعبير عن مقاومة الضغط. ويحدد معهد الخرسانة الأمريكي نتيجة اختبار اسطوانة قياسية (قطر 150 مم وارتفاع 300 مم) فى الضغط للتعبير عن مقاومة الضغط. وهناك العديد من العوامل التى تؤثر على نتيجة اختبار الضغط نذكر منها ما يلى:

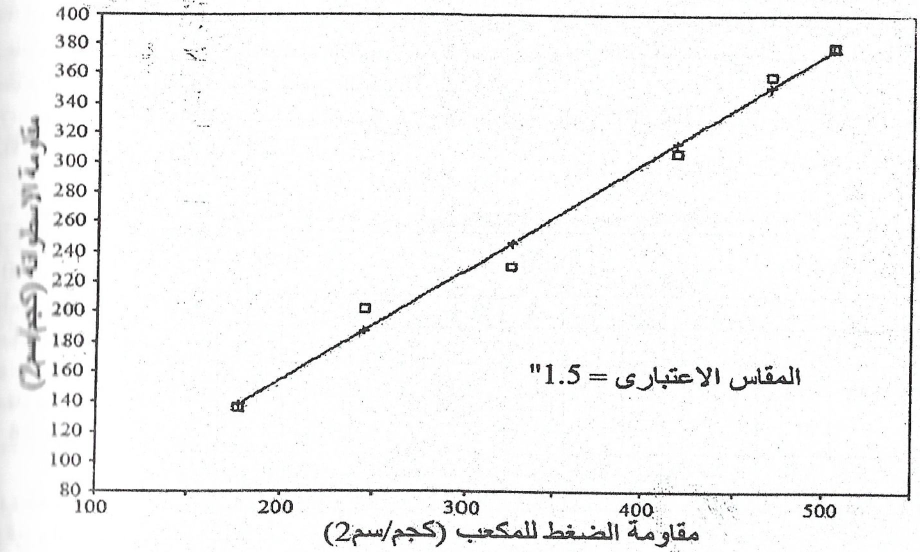
أ- شكل عينة الاختبار:

من الأبحاث والتجارب السابقة وُجد أن لنفس رتبة الخرسانة (خرسانة لها نفس المكونات ولها نفس ظروف الصب والاختبار), فإن مقاومة ضغط الخرسانة للمكعب (F_{cu}) أكبر من مقاومة الضغط للاسطوانة (F_{cy}). والفرق فى المقاومة بينهما يقل مع زيادة مقاومة الخرسانة. ويمكن استخدام المعادلة التالية للربط بين المقاومتين.

$$F_{cy} = F_{cu}\,(0.76 + 0.20 \log \frac{F_{cu}}{20}) \qquad \text{.........(المقاومات ن/مم}^2)$$

وشكل (7-8) يوضح احدى العلاقات بين مقاومة الضغط للمكعب ومقاومة الضغط للأسطوانة, والتى تتغير كثيراً بمستوى مقاومة الضغط والمقاس الاعتبارى الأكبر للركام

ونسبة الارتفاع للقطر بالنسبة للأسطوانة. ولذلك يفضل أن يقوم المهندس بتحديد هذه النسبة فى الموقع باستخدام خرسانة المنشأ.



شكل (8-7) العلاقة بين مقاومة ضغط المكعب ومقاومة الاسطوانة

ب. نسبة الارتفاع للقطر ($\frac{h}{d}$) :

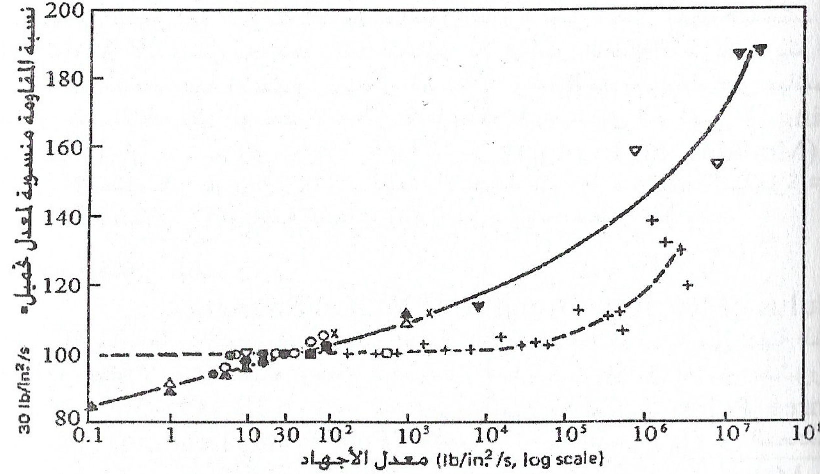
كلما زادت نسبة الارتفاع للقطر تقل مقاومة الضغط. وكثيراً ما يتعرض المهندس لاختبار عينات غير قياسية. وفى تلك الحالة فيجب عليه استخدام معامل تصحيح للمقاومة لتحويل العينة الغير قياسية إلى نتيجة مقاومة اسطوانة قياسية ($\frac{h}{d} = 2.0$) . وجدول (2-7) يحتوى على قيم التصحيح المنصوص عليها فى المواصفات البريطانية (BS) وهيئة المواد الأمريكية (ASTM).

جدول (2-7) معامل تصحيح نتائج اسطوانة غير قياسية إلى اسطوانة قياسية

نسبة الارتفاع إلى القطر ($\frac{h}{d}$)	معامل التصحيح	
	ASTM C 42-77	BS 1881-1970
2.00	1.00	1.00
1.75	0.98	0.98
1.50	0.96	0.96
1.25	0.93	0.94
1.00	0.87	0.92

ج. معدل التحميل:

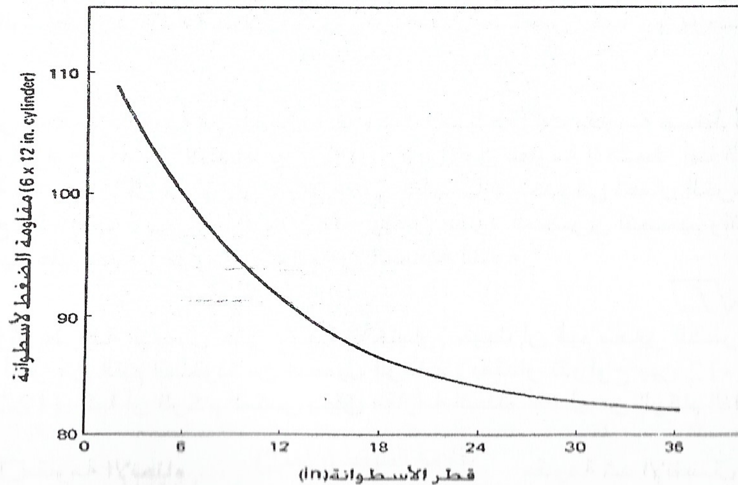
يجب أن يلتزم من يقوم بإجراء الاختبار بتحميل العينات بمعدل التحميل التى تنص عليه المواصفات القياسية؛ لأنه إذا تم التحميل بمعدل أعلى فإن المقاومة سوف تزيد زيادة كاذبة والعكس صحيح. وشكل (9-7) يوضح تأثير معدل التحميل على النسبة بين مقاومة الضغط عند معدل تحميل معين والمقاومة عند معدل تحميل 30 رطل/بوصة^2/ثانية.



شكل (9-7) تأثير معدل التحميل على نسبة مقاومة الضغط.

د. مقاس عينة الاختبار:

يؤثر مقاس عينة الاختبار تأثير مباشر على مقاومة ضغط الخرسانة, حيث تتحسن المقاومة كلما نقصت أبعاد العينة. وشكل (10-7) يوضح تأثير قطر الاسطوانة على مقاومة الضغط.



شكل (10-7) تأثير قطر الاسطوانة على مقاومة الضغط

4-7 مقاومة شد الخرسانة Tensile Strength :

بعض المنشآت والعناصر لا يسمح فيها بظهور الشروخ تماماً (مثل خزانات السوائل والرصف الخرسانى), وفى بعضها يسمح بشرخ سمكه محدود جداً. وفى تلك الحالة فإن الخرسانة يجب أن تكون لها مقاومة شد جيدة تكون قادرة على تحمل إجهادات الشد بأمان. وعموماً فإن مقاومة الشد يمكن تحديدها بالشد المباشر للأغراض البحثية فقط. حيث يتم الحاجة لاحتياطات خاصة لمسك عينة الاختبار, ويمكن تحديد مقاومة الشد بطريقة غير مباشرة عن طريق اختبار شد الانفصال (أو شد الانفلاق كما يذكر فى بعض المراجع) (Splitting Tension Test), أو عن طريق تحديد معاير الكسر (Modulus of Rupture), وذلك بإجراء اختبار الانحناء كما سيسرد لاحقاً. وأثبتت الأبحاث أن مقاومة الشد المباشرة = 0.85 من مقاومة شد الانفصال, وأن مقاومة الشد = 0.60 من مقاومة معاير الكسر.

1-4-7 مقاومة معاير الكسر:

(Modulus of Rupture Strength) (Flexural Strength):

تعرَّف مقاومة معاير الكسر بأنها أقصى إجهاد شد تتحمله الخرسانة فى جهة الشد عند تعرض الخرسانة لأحمال انحناء. ويمكن تحديدها عملياً عن طريق اختبار منشور بأبعاد (100×100×500مم) فى الانحناء إما بتحميل ثلاثى (Three Points Loading), أو بتحميل رباعى (Four Points Loading). ويُحسب معاير الكسر (f_{tu}) من المعادلة:

$$f_{tu} = \frac{M_u . y}{I}$$

حيث

← M_u = عزم الانهيار للمنشور.

← y = ½ عمق المنشور = 50 مم.

← I = عزم القصور الذاتى للمنشور = $\frac{100^4}{12}$.

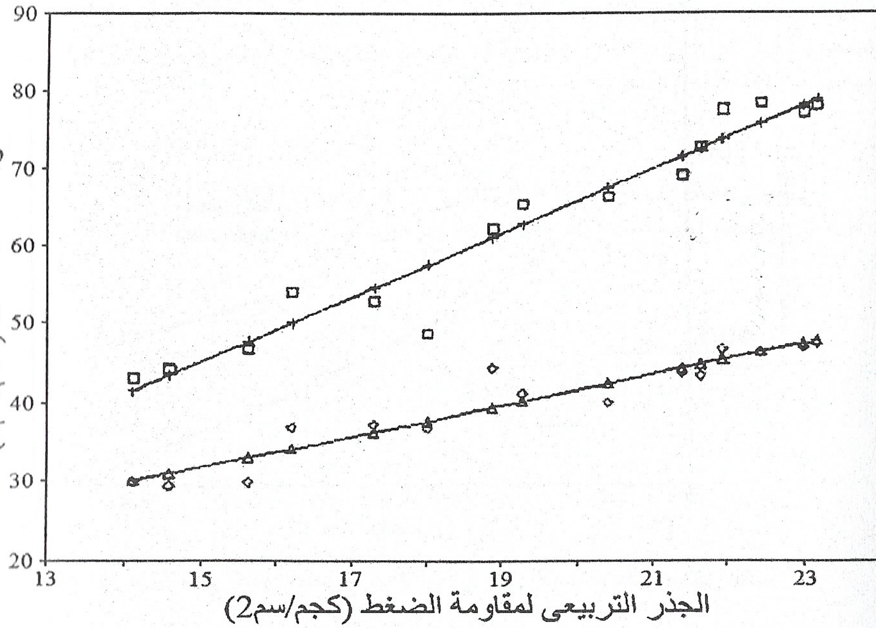
ويلاحظ أن هناك ارتباط وثيق بين مقاومة الضغط ومقاومة معاير الكسر. فكلما زادت مقاومة الضغط تزيد مقاومة معاير الكسر لكن بمعدل متناقص, كما هو موضح فى شكل (11-7).

وللخرسانة المستخدمة فى أعمال الخرسانة المسلحة ذات مقاومة ضغط أكبر من 20 ن/مم^2 ، تتراوح مقاومة الانحناء بين 0.07 ، 0.16 من مقاومة الضغط. أما الخرسانة ذات المقاومة الضعيفة (أقل من 20 ن/مم^2), والتى غالباً ما تستخدم فى أعمال الخرسانة العادية, فتتراوح تلك النسبة بين 0.16 ، 0.20. وينص الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية على حساب مقاومة الانحناء من المعادلة التالية :

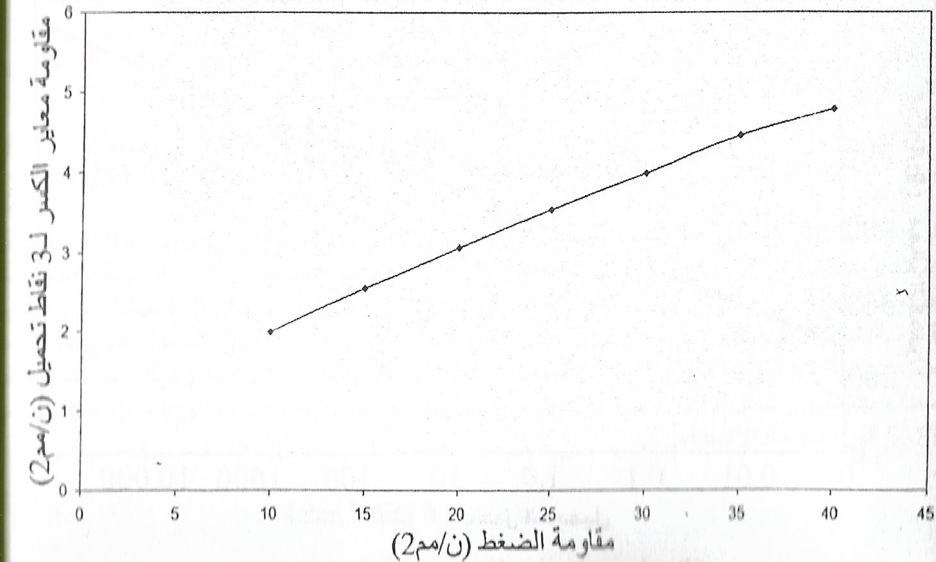
$$f_{tu} = 0.6\sqrt{f_{cu}}$$

وتؤثر طريقة التحميل على نتيجة الاختبار, حيث أن قيم معاير الكسر فى التحميل الثلاثى أكبر من القيم المأخوذة من التحميل الرباعى بمقدار تتراوح بين 12، 30%, انظر شكل (12-7). كما أن الركام المكسر يحقق مقاومة انحناء أفضل من الركام الدائرى.

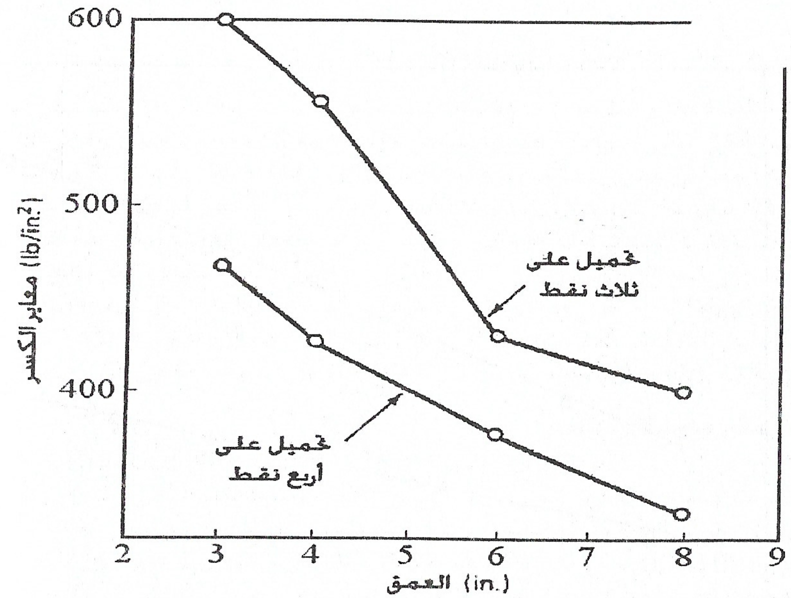
□مقاومة الإنحناء   مقاومة شد الإنفصال



شكل (7-11- أ) العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الانحناء ومقاومة شد الانفصال لكسر أحجار من منطقة الحمام

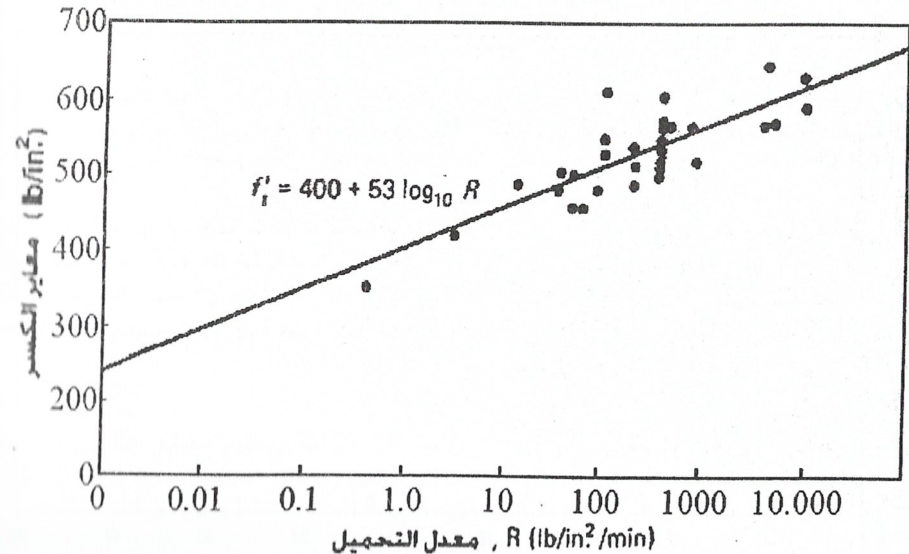


شكل (7-11- ب) العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة معاير الكسر



شكل (12-7) تأثير عمق الكمرة ونوع التحميل فى الانحناء على معاير الكسر

كما أن معدل التحميل فى الانحناء يؤثر تأثيراً ظاهرياً على مقاومة الانحناء, ويتضح ذلك من شكل (13-7), حيث أنه كلما زاد معدل التحميل زاد معاير الكسر.



شكل (13-7) تأثير معدل التحميل على معاير الكسر

2-4-7 مقاومة شد الانفصال (Splitting Tensile Strength):

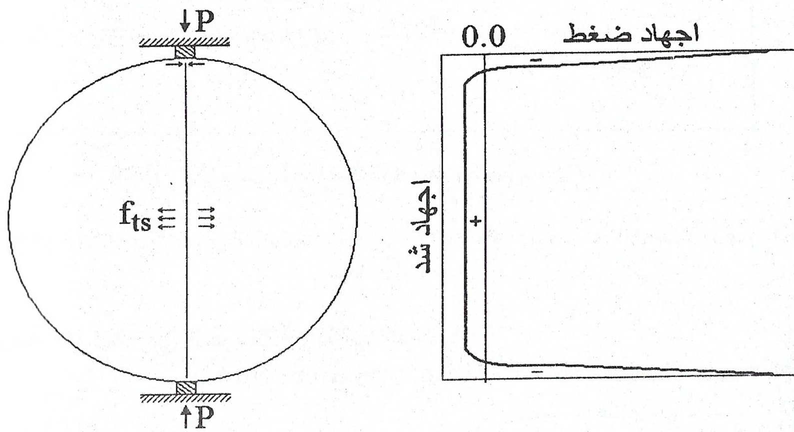
كما هو موضح بشكل (14-7) فإنه إذا عُرضت اسطوانة من الخرسانة لحمل ضغط على راسمها الخارجى, فإنه تتولد إجهادات ضغط عند الأطراف أسفل الحمل مباشرة, يمكن حسابها من المعادلة التالية:

$$\text{إجهاد الضغط} = \frac{2P}{\pi LD}\left[\frac{D^2}{r(D-r)}-1\right]$$

حيث r بعد النقطة عن قمة الاسطوانة و L طولها و D قطرها.

ويمكن حساب إجهادات الشد المتوسطة فى منتصف الاسطوانة من المعادلة:

$$\text{إجهاد الشد المتوسط} = \frac{2P}{\pi LD}$$

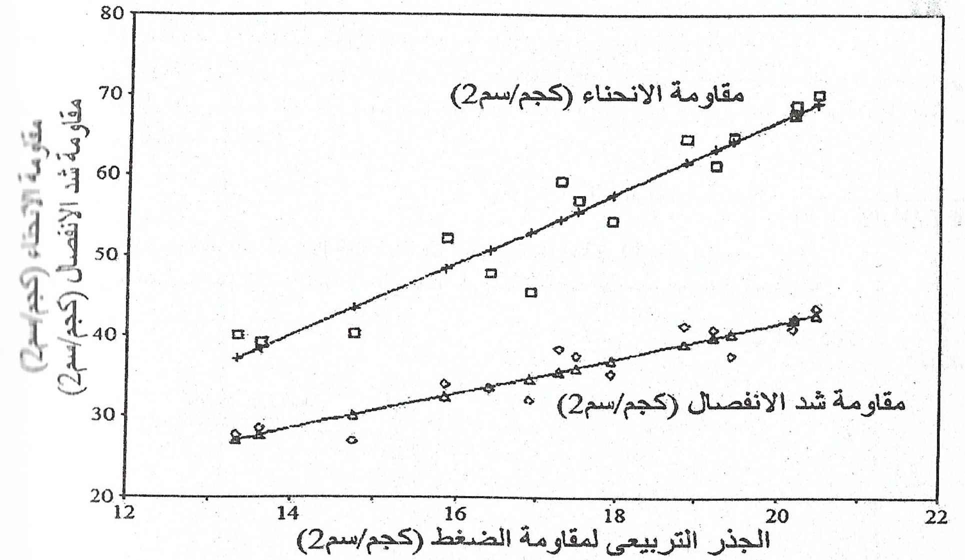


شكل (14-7) توزيع الإجهاد العرضى لاسطوانة محملة رأسياً فى اختبار شد الانفصال

فإذا عُرضت اسطوانة خرسانية (قطر 15 وارتفاع 30 سم) لحمل ضغط (P) متزايد حتى حدوث الكسر عند حمل (P_u), فتُحسب مقاومة شد الانفصال (f_{ts}) من المعادلة:

$$f_{ts} = \frac{2p_u}{\pi LD} = \frac{2p_u(KN)}{\pi\times300\times150} N/mm^2$$

وعند اختبار الاسطوانة يجب وضع شريحة من الخشب الأبلكاج (Plywood) بعرض 25مم وسمك 3مم فى أعلى وأسفل الاسطوانة, حتى تتلاشى تهشيم الخرسانة نتيجة إجهادات الضغط العالية فى أعلى وأسفل الاسطوانة. ويلاحظ أنه يمكن استخدام المكعبات فى تحديد مقاومة شد الانفصال مع استخدام الشريحتين الخشبيتين فى تركيز الحمل فى منتصف المكعب. وأثبتت الأبحاث أن مقاومة شد الانفصال تزيد كلما زادت مقاومة الضغط ولكن بمعدل متناقص, شكل (15-7). ويلاحظ أن قيم مقاومة شد الانفصال تتراوح بين 65% إلى 80% من مقاومة الانحناء.



شكل (15-7) العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الانحناء ومقاومة شد الانفصال لكسر أحجار من منطقة الضبعة

5-7 مقاومة الترابط بين الخرسانة وصلب التسليح:

Bond between Concrete and Reinforcement Steel:

من المعلوم أنه فى الخرسانة المسلحة يتم وضع أسياخ صلب فى جهة الشهد لتحمل قوى الشد الموجودة الناشئة عن الانحناء أو عن أحمال الشد المباشرة. وفى حالة الأعضاء المعرضة للانحناء, فإن قوى الشد تنتقل من أسياخ التسليح إلى الخرسانة عن طريق إجهادات الترابط (Bond Stress). وهذه الإجهادات يجب أن تكون مسموح بها. وإذا زاد حمل الانحناء بحيث تصل هذه الإجهادات لأقصى قيمة, يحدث انهيار ناتج عن حدوث زحزحة فى السيخ (Slip of Steel). وتنتشر الشروخ فى تلك الحالة حول الأسياخ. وشكل (16-7) يوضح ميكانيكا الترابط . ومعملياً يمكن وضع سيخ لايقل قطره عن 16 مم فى منتصف قالب اسطوانى ويتم الصب بحيث نحافظ على مركزية السيخ وعند عمر 28 يوم يتم شد السيخ لنزعه عن طريق ماكينة اختبار ويتم قياس الزحزحه فى السيخ . ويمكن حساب مقاومة الترابط بإستخدام المعادلة التالية :

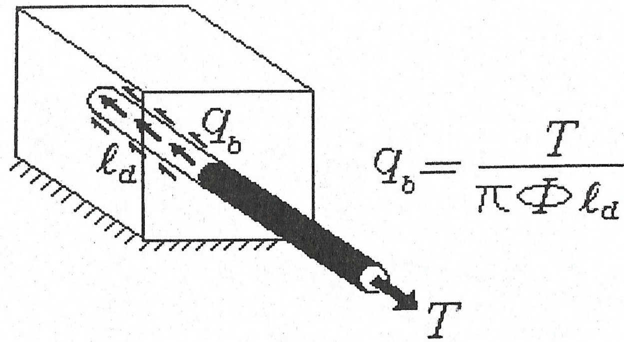
$$q_b = \frac{T}{\pi \Phi l_d}$$

حيث T حمل النزع .

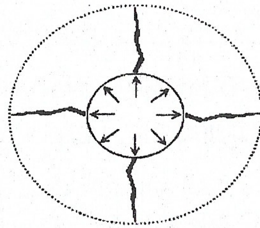
و Φ قطر السيخ

و ld الطول المدفون

وشكل (17-7) يوضح شكل شروخ الانهيار نتيجة فقد مقاومة الترابط. وأغلب هذه الشروخ تسمى شروخ انفصال.

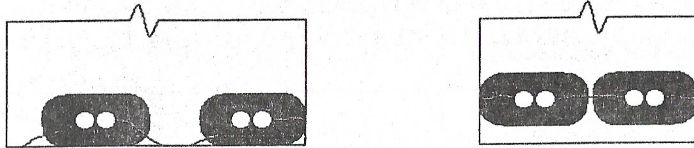


شكل (16-7) ميكانيكا إجهادات الترابط بين سيخ التسليح والخرسانة



شروخ الانفصال حول السيخ

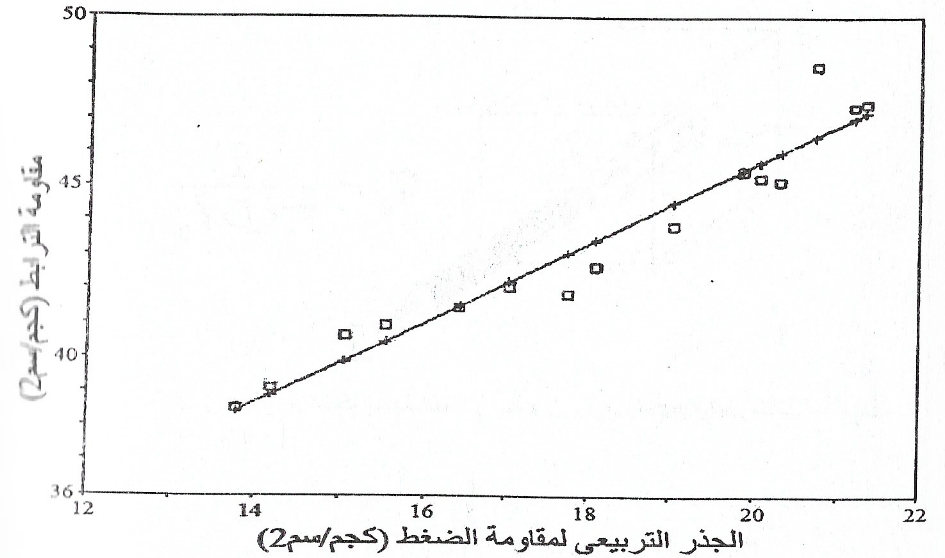
الناتجة من فقد الترابط فى الأسياخ عند الوصلات



شروخ الانفصال الناتجة من فقد الترابط فى الأسياخ عند الوصلات

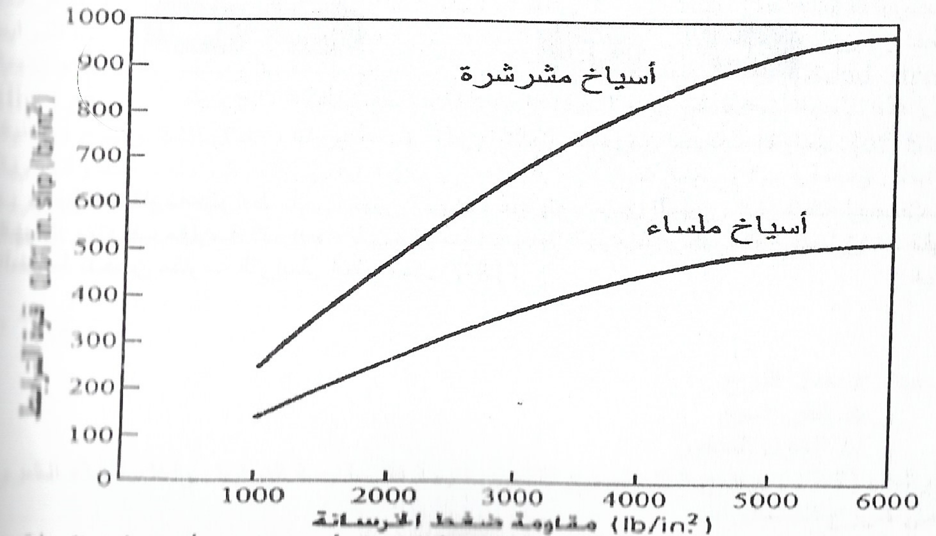
شكل (17-7) الشروخ الناشئة عن الانهيار الناتج من إجهادات الترابط

وتعرَّف مقاومة الترابط بأنها أقصى إجهاد قص يتولد بين السيخ والخرسانة ويحدث عنده الانهيار. وتتوقف مقاومة الترابط على مقاومة الضغط للخرسانة, حيث أنه كلما زادت مقاومة الضغط تتحسن مقاومة الترابط, انظر شكل(18-7).

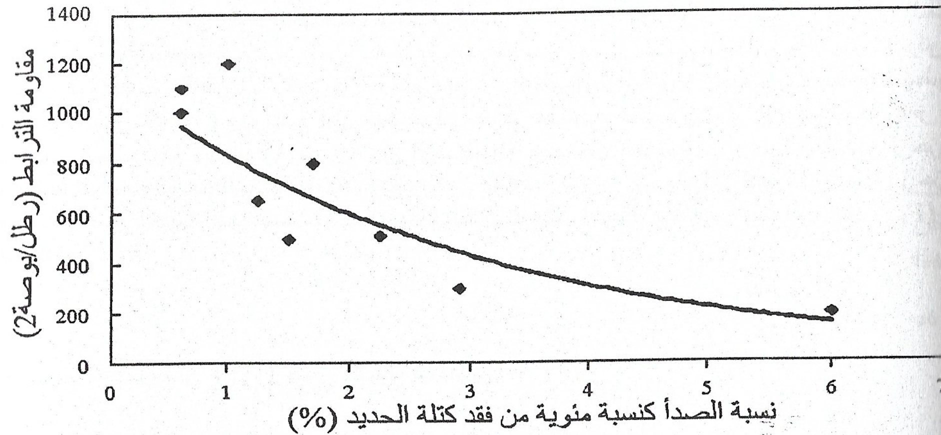


شكل (18-7) العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الترابط بين صلب التسليح والخرسانة

وتتوقف تلك المقاومة على شكل سطح الأسياخ الخارجي, **هل السيخ** أملس أم ذو نتوءات, حيث تتحسن مقاومة الترابط كثيراً بوجود النتوءات على سطح السيخ, انظر شكل (19-7), و يجب أن تكون النتوءات قياسية من جهة عددها فى المتر الطولى وزاويتها ... الخ. ومن العوامل المهمة فى تخفيض مقاومة الترابط هو تعرض صلب التسليح للصدأ, حيث أنه بزيادة كمية الصدأ تحدث شروخ وتفتت فى الخرسانة حول الأسياخ مما يقلل من مقاومة الترابط, انظر شكل (20-7). وجدول (3-7) يوضح مقاومة الترابط المستخدمة بالكود البريطاني.



شكل (19-7) العلاقة بين مقاومة الضغط ومقاومة الترابط لأسياخ ملساء وأسياخ ذات نتوءات



شكل (20-7) تأثير نسبة الصدأ على مقاومة الترابط

جدول (3-7) قيم مقاومة الترابط للأسياخ كدالة من مقاومة الضغط (ن/مم²)

مقاومة الضغط ن/مم²	20	25	30	40
تسليح أملس	1.7	2.0	2.2	2.7
تسليح ذو نتوءات	2.1	2.5	2.8	3.4

ويجب على المهندسين حساب طول الترابط (L_d) لأسياخ التسليح بحيث نتجنب حدوث انهيار فى الأعضاء الخرسانية, نتيجة فقد الترابط قبل الوصول لأقصى عزم يتحمله القطاع فى الانحناء.

يوصى الكود المصرى بحساب مقاومة الترابط (f_{bu}) من المعادلة:

$$f_{bu}=0.3\sqrt{\frac{f_{cu}}{\propto_c}}\,N/mm^2$$

معامل خفض المقاومة $\propto c = 1.5$

ويحسب طول الترابط للأسياخ من المعادلة:

$$Ld = \frac{\propto .\beta .\sigma \left(\frac{f_y}{\propto s}\right)}{4 f_{bu}} .\Phi$$

حيث

← Φ = قطر السيخ

← $\propto$ معامل تصحيح يعتمد على شكل طرف السيخ (يتراوح من 0.50 إلى 1.00).

← β معامل يتوقف على نوع السيخ.

← σ معامل يتوقف على موقع السيخ (فى حالة الأسياخ ذات النتوءات = 0.45 ، 0.75 فى الضغط والشد على الترتيب للأسياخ الأفقية المعرضة للشد والتى يزيد سمك الخرسانة المصبوبة أسفلها عن 300 مم).

← σ = 1.00 للحالات الأخرى لوضع الأسياخ, وقيم $\propto$، β موجودة فى الكود المصرى.

ومن المهم جداً أن يقوم المهندس بتنظيف أسياخ التسليح من الأتربة والزيوت قبل الصب مباشرة. ومن المهم التأكيد على أنه لا يوجد اختبار قياسى لتحديد مقاومة الترابط. وتوجد اختبارات لتحديد المقاومة التقريبية مثل اختبار Pull–Out–test. حيث يتم صب اسطوانة خرسانية (أو مكعب) ويوضع قبل الصب فى مركزها سيخ قطره 16 أو 18 مم وبعد عمر 28 يوم من الصب يتم شد السيخ لنزعة من الإسطوانة ونسجل العلاقة بين حمل الشد والزحزحة (slip) للسيخ وترسم العلاقة بينهما ويعبر عن مقاومة النزع بإجهاد الترابط الذى يحقق زحزحة معينة تنص عليها المواصفات القياسية ويمكن حساب المقاومة الحرجة للترابط (F_{bu}) من المعادلة التالية :

$$F_{bu} = \frac{Tu}{\Pi \Phi \ L}$$

حيث Tu حمل النزع و L طول السيخ المدفون.

6-7 ميكانيكا التصدع (Fracture Mechanics):

1-6-7 منحنى مور للانهيار (Mohr's Failure Criterion):

استخدم والتر منحنى على هيئة قطع مكافئ ليمثل منحنى مور لانهيار الخرسانة, وقد افترض أن نسبة مقاومة الشد/مقاومة الضغط $\frac{f_{tu}}{f_{cu}} = \frac{1}{8}$. وشكل (21-7) يوضح الإجهادات العمودية وإجهادات القص لنقطة فى المستوى Y, X فى عضو خرسانى. وشكل (22-7) يمثل دائرة مور للإجهادات فى الاتجاهات المختلفة لهذه النقطة. أما شكل (23-7) فيوضح دائرة مور للانهيار لخرسانة مقاومتها فى الشد والضغط f_{cu}, f_{tu}.

وقام والتر بوضع المعادلة التالية لهذا المنحنى:

$$q^2 = \frac{1}{2} f_{cu} - \frac{1}{16} f_{tu}^{\ 2} = 0.0 \qquad ....(1\text{-}7)$$

حيث q ، f عبارة عن إجهاد القص والإجهاد العمودى لنقطة على منحنى مور.
ويمكن التعبير عن معادلة الإجهاد العامة كما يلى:

$$f^2 + q^2 - (f_x + f_y) f + f_y f_x - q_{xy}^{\ 2} = 0.0 \qquad ....(2\text{-}7)$$

حيث f_x، f_y، q_{xy} مركبات الإجهاد للعضو dxdy فى الجسم الواقع فى الإحداثيات XY أشار مور أنه لكى يحدث انهيار فإن دائرة الإجهادات العامة يجب أن تمس منحنى مور للانهيار.

حل والتر المعادلتين (1-7) و(2-7) معاً. وفى حالة f_y=0.0 توصل لمنحنى الانهيار الممثل بالمعادلتين (3-7) و(4-7).

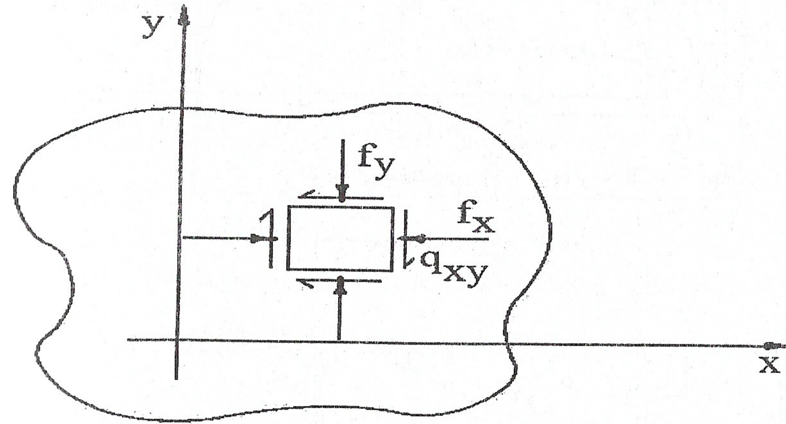
$$\left(\frac{fx}{fcu} > 0.25 \text{ وذلك فى حالة}\right) \quad ....(3\text{-}7)$$

$$\left(\frac{f_x}{f_{cu}}\right)^2 - \left(\frac{f_x}{f_{cu}}\right) + \left(\frac{2 q_{xy}}{f_{cu}}\right)^2 = 0.0$$

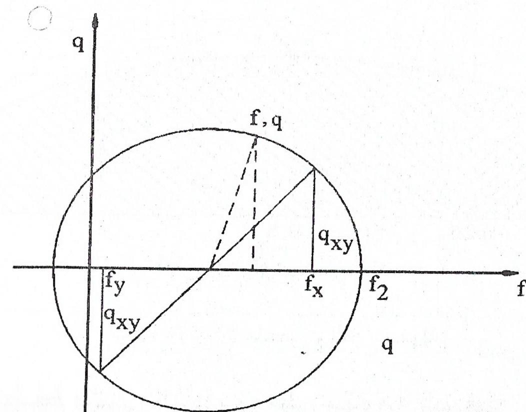
$$\left(\frac{fx}{fcu} < 0.25 \text{ ذلك فى حالة}\right) \quad ....(4\text{-}7)$$

$$\left(\frac{8\, qxy}{f_{cu}}\right)^2 - \left(\frac{8\, f_x}{f_{cu}}\right) - 1 = 0.0$$

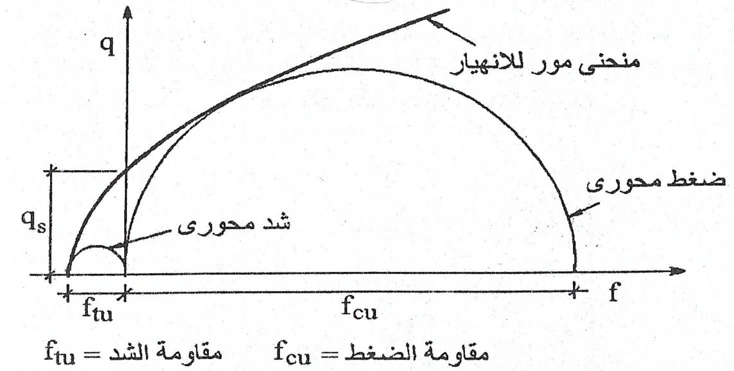
ومنحنى الانهيار ذلك موضح فى شكل (24-7), وفيه الإجهادات منسوبة لمقاومة الضغط, ويمكن بمعرفة الإجهاد العمودى الواقع على الخرسانة توقع إجهاد القص الذى سيؤدى إلى الانهيار ومن هنا يمكن للمهندس التعرف على مقاومة الخرسانة للقص .



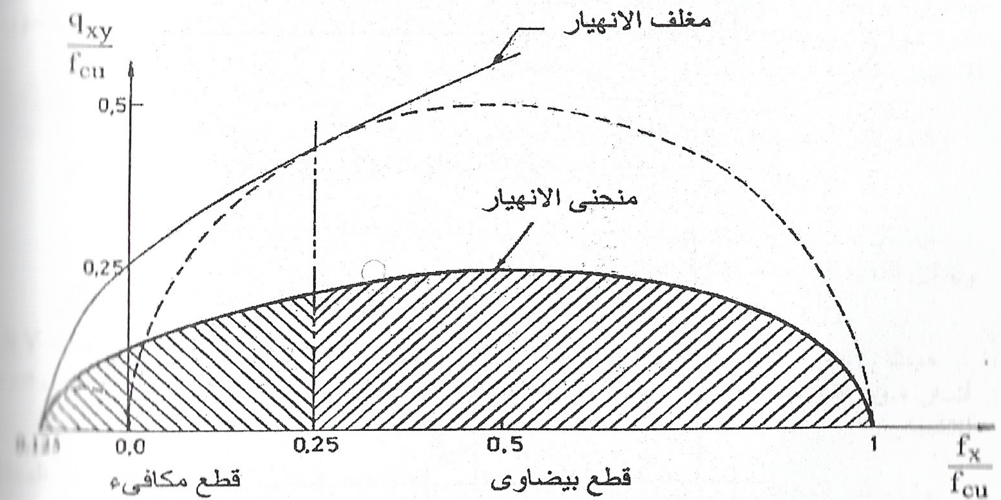
شكل (21-7) الإجهادات المؤثرة على عنصر خرسانى



شكل (22-7) دائرة مور للإجهادات



شكل (7-23) منحنى مور المغلف للانهيار.

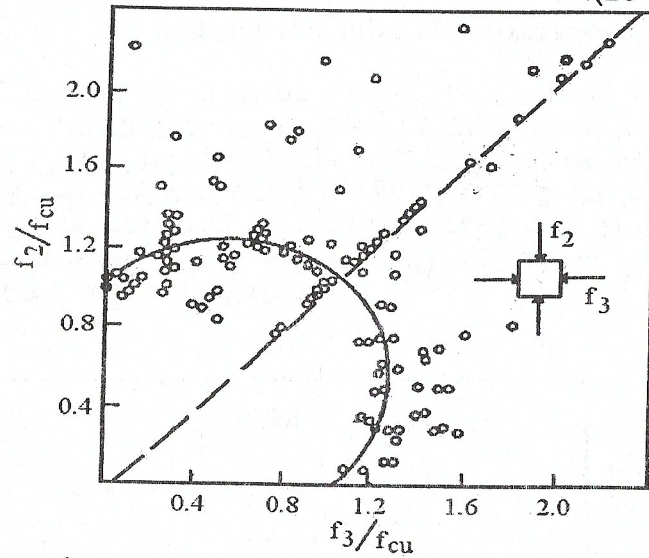


شكل (7-24) منحنى والتر للانهيار

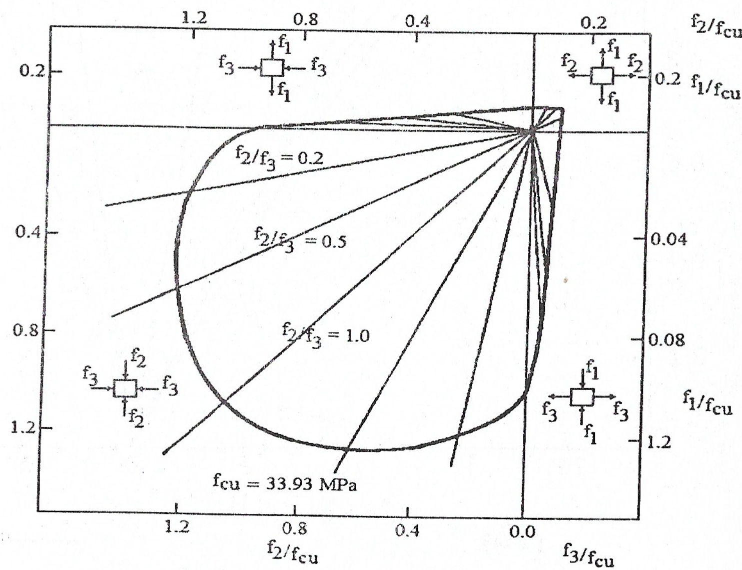
2-6-7 تأثير حالة الضغط الثنائى المحوري على مقاومة الضغط:

(Biaxial Compression Strength):

لكى يمكننا متابعة تأثير الضغط الثانى على مقاومة الضغط, فإننا يجب أن نتذكر أن الإجهادات الرئيسية هى f_1, f_2, f_3, بحيث تكون $f_3 < f_2 < f_1$. والانفعالات الرئيسية المناظرة هى ζ_1، ζ_2، ζ_3 وقد توصل إبراهام وآخرون إلى أن مقاومة الضغط تتحسن فى وجود الضغط الجانبى. وتصل الزيادة فى مقاومة الضغط لحوالى 22 % ولذلك لنسبة $\frac{f_1}{f_2} = 0.50$, انظر شكلى (7-25) وشكل (7-26).



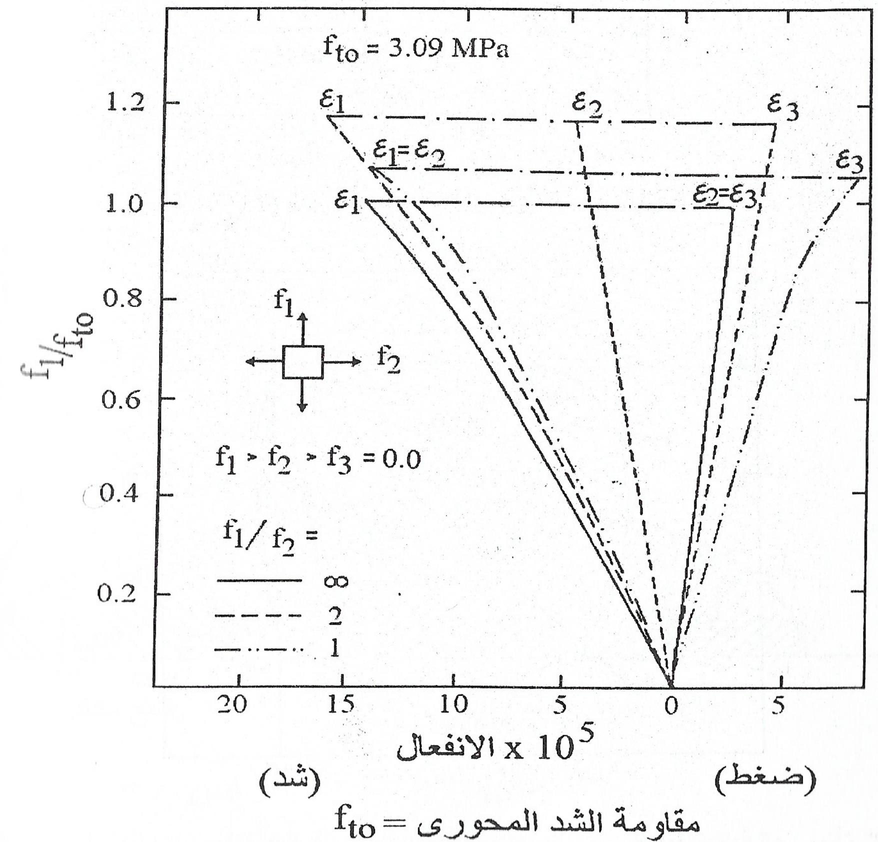
شكل (7-25) تأثير الضغط الجانبى على مقاومة الضغط



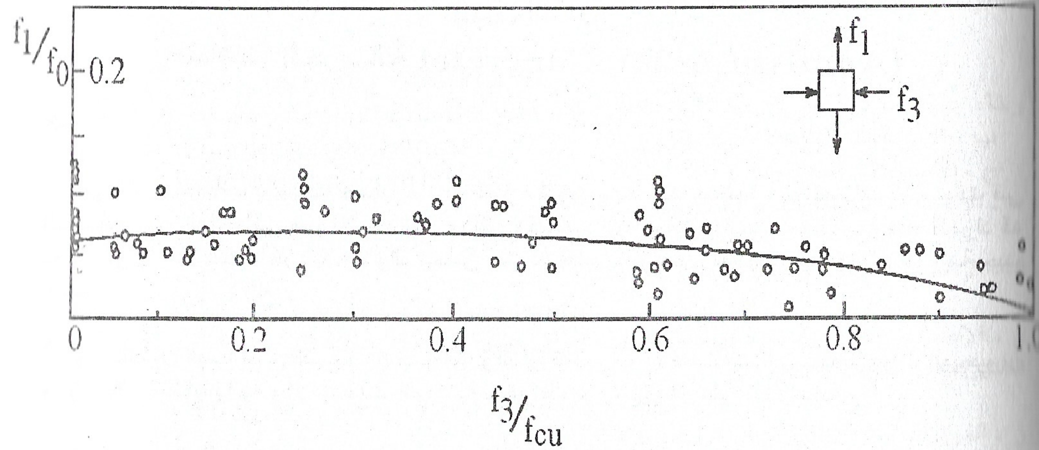
شكل (7-26) تأثير حالات التحميل الثنائى على مقاومة الخرسانة

3-6-7 تأثير وجود شد جانبى على مقاومة الضغط:
(Biaxial Compression Tension Strength):

قد تتعرض الخرسانة بجانب إجهادات الضغط الرأسى إلى إجهادات شد فى الاتجاه الآخر, وفى تلك الحالة أثبتت الأبحاث أن كل من مقاومة الضغط وانفعال الضغط يقلان مع وجود إجهاد شد عرضى, ويزيد النقص فى مقاومة الضغط والانفعال مع زيادة إجهاد الشد. والنتيجة السابقة يمكن متابعتها بوضوح من شكلى (7-27) و(7-28), حيث يقل إجهاد الضغط الرئيسى f_3 إذا ما قورن بمقاومة الضغط فى حالة عدم وجود إجهاد شد عرضى (f_o). ومن الملاحظ نقص انفعال الضغط عند الانهيار من 300×10^{-5} سم/سم إلى حوالى 80×10^{-5} سم/سم.
وفيما يخص شكل الانهيار فسيتم تناوله فى الباب العاشر.



شكل (7-27) تأثير إجهاد الشد العرضى على مقاومة الضغط والانفعال



شكل (7-28) تأثير إجهاد الشد العرضى